中国生态农业学报　2016 年 8 月　第 24 卷　第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1114−1122

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160076

河北低平原区冬小麦夏玉米产量提升的理论与技术研究*

邵立威[1]　罗建美[1,2]　尹工超[3]　刘树勋[4]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室　石家庄　050022; 2. 河北地质大学土地资源与城乡规划学院　石家庄　050031; 3. 河北省南皮县农业局　南皮　061500; 4. 河北省种子管理总站　石家庄　050000)

摘　要　作为渤海粮仓主要增粮区的河北东部低平原中低产农田，冬小麦夏玉米的产量主要受制于土壤肥力水平低、淡水资源短缺和气候异常造成产量的大幅波动。通过选择适宜的品种、播期与收获期的合理搭配、优化的种植方式和配套的耕作与田间管理技术，提高作物生育期内对地上光热资源和地下水肥资源的利用潜力和效率，平抑气候变化带来不利影响，有着巨大的增产空间。该研究通过田间小区试验，结合示范区试验示范，研究了冬小麦与夏玉米生育期的优化、夏玉米种植方式调整、夏玉米深松播种、夏玉米增施钾肥与冬小麦增施磷肥及有机肥等措施对冬小麦、夏玉米产量的影响。主要研究结果如下：冬小麦适期晚播(不迟于 10 月 15 日)，同时适当增加播量，不影响生育期群体构建和产量水平。早熟品种‘小偃 81’提早进入灌浆期，受后期干热风的危害小，在不降低品质的同时粒重与产量稳定。夏玉米提早播 10 d(6 月 10 日与 6 月 20 日相比)平均增产 17.2%，晚收获 8 d(10 月 2 日与 9 月 24 日相比)粒重增加 19.5%。根据冬小麦和夏玉米的品种特性，合理搭配生育期，在实现冬小麦稳产提质的同时，使充分发挥夏玉米的产量潜力成为可能。改变夏玉米的种植方式，适当增加种植密度，明显地改善和提高了夏玉米产量，更为适宜的种植方式是 40 cm 与 80 cm 大小行种植和 38 cm 等行距种植，不适宜的是 20 cm 与 100 cm 大小行种植，更为适宜的种植方式下产量提高 15%以上。长期旋耕机械压实了犁底层，通过夏玉米深松播种种植，产量提高达 31.3%，后茬小麦增产 5.6%，但连续深松没有明显的增产效果。夏玉米播种时增施钾肥产量提高 2.6%。冬小麦增施磷肥产量提高 7.4%，增施有机底肥增产 6.8%，增施有机底肥和施磷肥产量提高 8.8%，但无明显的累加效果。因此，通过适宜的品种选择与适期的生育期搭配、种植方式调整、适时深松打破犁底层的耕作措施、速效肥与有机肥合理施用等栽培和管理技术，可实现冬小麦夏玉米产量的逐步提高和稳定，充分利用玉米生长季丰富且集中的降水与光热资源，挖掘夏玉米产量，稳夏增秋的粮食增产模式更符合该地区未来发展需求。

关键词　冬小麦　夏玉米　增产　品种特性　生育期搭配　种植方式　深松　施肥　河北低平原区
中图分类号: S154.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2016)08-1114-09

Research on exploiting wheat-maize grain yield theory and technology in the eastern low plain of Hebei Province*

SHAO Liwei[1], LUO Jianmei[1,2], YIN Gongchao[3], LIU Shuxun[4]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Land Resources and Rural-Urban Planning, Hebei Geosciences University, Shijiazhuang 050031, China; 3. Agricultural Bureau of Nanpi County, Nanpi 061500, China; 4. Seeds Management Station of Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract　Medium and low-yield fields in the low plains of East Hebei Province are critical for “Bohai Granary” project for

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B05, 2013BAD05B02)和河北省渤海粮仓科技示范工程专项资助
邵立威，主要研究方向为作物高产与水分高效利用。E-mail: liwishao@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2016−01−29　接受日期: 2016−04−29

* The study was supported by the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD05B05, 2013BAD05B02) and Hebei S&T Special Fund for “Bohai Granary” Project.
Corresponding author, SHAO Liwei, E-mail: liwishao@sjziam.ac.cn
Received Jan. 29, 2016; accepted Apr. 29, 2016

increasing grain yields at national level. Winter wheat-summer maize double cropping system is the main planting pattern for agricultural production in the area. The growth of winter wheat and summer maize is seriously restricted by water deficit, soil fertility and climate fluctuations, which results in the decreasing of grain yield. Summer maize growth season is accompanied by sufficient rain and heat, while winter wheat season is deficit in both rain and heat. There is a high potential to increase grain yield by selecting suitable cultivars, reasonable date of sowing matching with harvesting, optimization of planting, cultivation and management modes and technologies. The main aim of this research was to exploit increasing measures of winter wheat and summer maize grain yields with enhanced potential and use efficiency of resources such as water and fertilizer (by underground roots) and light and heat (by over-ground canopy). A total of eight field experiments were designed in the research, which included winter wheat seeding date, winter wheat cultivar, summer maize seeding date, summer maize harvesting date, summer maize planting pattern adjustment, deep scarification of summer maize planting, potassium fertilizer dose for summer maize, and phosphorus and organic fertilizer doses for winter wheat. The results showed that postponement of sowing date and increased seeding rate of winter wheat did not change grain yield. Early maturity winter wheat cultivar reduced the effect of dry hot wind which in turn stabilized grain yield and quality. Early seeding of summer maize by 10 days increased grain yield by 17.2%, while late harvesting by 8 days increased grain weight by 19.5%. Adjustment of summer maize planting patters improved canopy structure and enhanced the use efficiency of photosynthetically active radiation. Row spacing of 40 cm wiht 80 cm and the same of row and plant spacing of 38 cm were superior to other planting patterns, which increased grain yield by more than 15%. Planting summer maize with deep scarification increased grain yield by 31.3% and improved the next winter wheat grain yield by 5.6%. However, these effects were not observed in successive deep scarification in the following years. Summer maize with increased potassium fertilizer improved grain yield by 2.6%, winter wheat with phosphorus fertilizer improved grain yield by 7.4%, and winter wheat with organic fertilizer improved grain yield by 6.8% compared with that of control. However, when phosphorus and organic fertilizers were used simultaneously, winter wheat grain yield increased by 8.8%, without obvious superposition effect of fertilizers. The steady increase in grain yield was due the selection of suitable cultivars which matched with the sowing periods and other management practices, planting patterns, planting technologies, fertilization schemes, tillage patterns, etc. The planting mode which stabilized winter wheat grain yield and increased the potentials of summer maize grain yield was most suitable in the study area. This mode made the fullest use of local climate factors such as precipitation, sunlight and soil heat.

Keywords　Winter wheat; Summer maize; Increased grain yield; Cultivar characteristic; Growth period matching; Planting pattern; Deep scarification; Fertilizer application; Low plain of Hebei Province

渤海粮仓主要分布于渤海西部海拔低于 20 m 的滨海平原区，其中 98%分布于河北省东部的低平原区[1]。冬小麦–夏玉米一年两作是该地区粮食生产的最主要种植模式。粮食增产的潜力受限于播种面积和单位面积产量(单产)，其中单产提高是问题的根本所在。河北东部的低平原地区大部分耕地为脱盐潮土，产量水平低，单位面积增产潜力大。同时还分布有面积广阔的未被合理开发利用的盐碱荒地。巨大的粮食增产空间，使该地区发展为我国重要粮仓成为可能。作物的增产研究[2]，一方面从微观上不断地解析深入，从个体、器官、细胞深入到分子或亚分子水平，到高产性状基因确定、分离、转移与高产品种的培育等；另一方面宏观上不断吸收现代科学技术的新成果，研究环境条件、生理过程和产量因素之间的关系，为作物产量提升建立合理农田生态系统提供可靠的信息、理论依据和配套措施。提高粮食单产能力是一个综合性系统工程[3]，通过对田间作物生态系统特点与过程的理解认识，利用适宜的技术手段和管理途径，实现对农田系统的有效调控与优化管理，在有限资源条件下挖掘最大产量潜力。

作物产量的实现，是品种特性与水、肥、光、热等气候条件与田间耕作与管理等多种因素相互作用的结果[4]。冬小麦品种更新，提高了作物田间的生产能力和生产效率，提高拔节前营养生长、增加花后干物质积累和花前物质转运，明显地提高了产量[5]。近 30 年以来，冬小麦品种更新增产的贡献率超过 50%[6]。随着玉米品种的更新，开花到成熟期间的生育天数延长，成熟期生物量和收获指数增加，提高了籽粒产量，新品种的增产贡献率为 46.1%~79.0%[7]。我们多年田间试验结果显示，当代新品种之间以及不同年型之间存在着巨大的产量差异，最大超过 20%。影响作物产量潜力发挥的重要限制因素之一，是环境条件的不确定性，模拟显示，气候驱动造成冬小麦产量降低超过 10%[6]。根据品种区域适应特性，通过各种管理和技术手段降低不利环境因素带来的影响，提高生育期对气候资源的利用能力和效率，是实现区域粮食增产的重要选择。当前冬小麦和夏玉米的品种越来越丰富多样，种植管理技术越来越先进。针对河北省东部低平原地区冬

小麦夏玉米产量波动大、水平低、效率差等问题，该研究综合各领域相关理论与技术，通过品种、生育期、种植结构、耕作、施肥等田间小区和大田示范试验，研究该地区粮食增产潜力挖掘的理论与适应技术，平抑气候不利因素带来的产量年际波动，提高整体产量水平。

1 区域背景与研究方法

1.1 区域背景

该研究在中国科学院南皮生态农业试验站和渤海粮仓南皮县白坊子示范区展开。南皮县是渤海粮仓重点示范县，处于暖温带半湿润大陆季风气候区。冬季寒冷少雪，春季干燥多风，夏季炎热多雨，秋季以晴为主，雨热同期，光热资源较为丰富。极端低温–27.6 ℃，极端高温 41.4 ℃，年平均气温 12.3 ℃。年日照总时数 2 938.6 h，年总辐射量为 559.2 kJ·cm^{-2}。最低年降水量 264.9 mm，最高年降水量 1 199.1 mm，年均降水量 550 mm，主要分布在 7—8 月份的玉米生长季节(图 1a)。多年以来，每年 5 月 25 日到 6 月 10 日冬小麦灌浆后期大于 30 ℃高温出现的概率呈增加趋势(图 1b)，多年平均日照时数呈减少趋势(图 1c)。

全县域海拔多在 20 m 以下。土壤属潮土、盐土两类，分褐化潮土、普通潮土、盐化潮土、草甸盐土 4 个亚类。普通潮土占总面积的 76%。土壤有机质含量低，氮、速效磷和速效钾含量均低于山前平原区，土壤整体肥力等级较差。全县土壤全氮含量平均 0.815 g·kg^{-1}，有效磷含量 20.0 mg·kg^{-1}，速效钾含量 137.3 mg·kg^{-1}，有机质含量 13~15 g·kg^{-1}。

1.2 试验设计

在 2011—2012 年和 2012—2013 年两个生长季，通过田间小区试验和大面积田间示范进行研究。主要包括冬小麦播期与播量试验、冬小麦品种对比试验、夏玉米播期试验、夏玉米晚收对籽粒灌浆影响试验、夏玉米种植结构调整试验、夏玉米深松种植试验、夏玉米增施钾肥试验和冬小麦增施磷肥有机肥试验，具体试验设计如下：

①冬小麦播期与播量试验：冬小麦品种为‘小偃 81’，试验包括 3 个播期和 3 个播量，播期分别为 10 月 7 日、10 月 14 日和 10 月 21 日，播量基本苗分别为 3.757 5×10^{6} 株·hm^{-2}、4.5×10^{6} 株·hm^{-2} 和 5.25×10^{6} 株·hm^{-2}；试验共 9 个处理，每个处理 4 次重复，试验在田间小区实施，小区面积为 50 m^{2}，试验地点为白坊子示范区。②冬小麦品种对比试验：3 个冬小麦品种分别为‘小偃 81’、‘小偃 60’和‘衡 4399’，每个品种种植面积 0.3 hm^{2}。③夏玉米播期试验：试验包括 3 个品种和 3 播期，品种为‘先玉 335’、‘郑单 985’和‘中科 11’，播期分别为 6 月 10 日、6 月 15 日和 6 月 20 日，共 9 个处理，每个处理 4 个重复；试验在田间小区进行，试验地点在白坊子示范区，种植密度为 6×10^{4} 株·hm^{-2}，小区面积为 50 m^{2}。④夏玉米晚收对籽粒灌浆影响试验：玉米品种为‘郑单 958’，在夏玉米收获期从 9 月 24 日开始到 10 月 2 日结束，每隔两天取 1 次穗，每次选择长势相同的玉米 10 穗，测

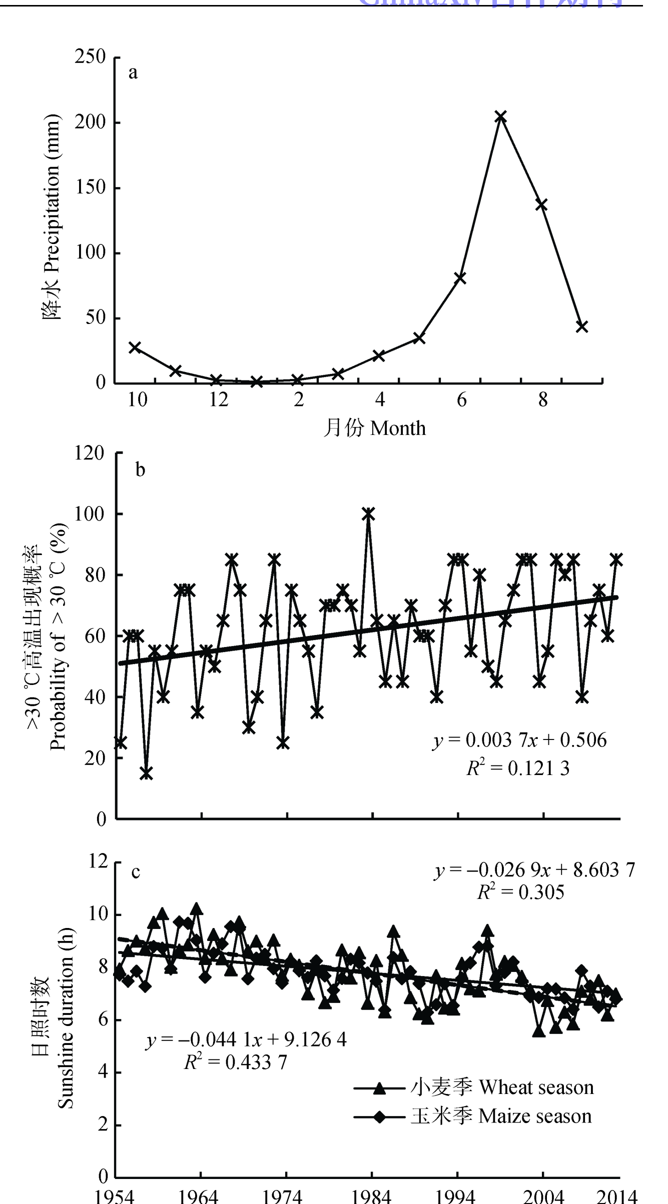


图 1 研究区冬小麦–夏玉米生长季多年平均降水(a)、5 月 25 日—6 月 10 日大于 30 ℃高温概率(b)和小麦季和玉米季日照时数(c)的变化

Fig. 1 Changes of annual average precipitation during growth season of winter wheat and summer maize (a), probability of temperature above 30 ℃ from 25 May to 10 June (b) and sunshine duration of winter wheat and summer maize seasons (c) in the study area

定百粒重。⑤夏玉米种植结构调整试验: 品种为‘先玉 335’, 种植密度为 6.75×10^4 株·hm^{-2}, 种植方式包括 60 cm 等行距(对照)、40 cm+80 cm 大小行距、20 cm+100 cm 行距和 38 cm 等行距种植, 共 4 个试验处理, 每个处理 4 个重复; 试验在田间小区进行, 小区面积为 60 m^2, 试验地点在中国科学院南皮试验站。⑥夏玉米深松种植试验: 玉米品种为‘先玉 335’, 利用深松与播种一体机进行播种, 对照为非深松普通种植, 每个处理种植面积各为 0.3 hm^2, 种植密度为 6×10^4 株·hm^{-2}, 试验在白坊子示范区进行。⑦夏玉米增施钾肥试验: 玉米品种为‘郑单 958’, 玉米播种时施钾肥 37.5 kg(K_2O)·hm^{-2}, 对照不增施钾肥, 播种面积各为 0.3 hm^2, 试验在白坊子示范区进行。⑧冬小麦底肥增施磷肥和有机肥试验: 冬小麦品种为‘小偃 81’, 试验处理包括普通(对照)磷肥处理, 施磷肥 172.5 kg(P_2O_5)·hm^{-2}; 增施磷肥处理, 施磷肥 207 kg(P_2O_5)·hm^{-2}; 增施有机肥处理, 施牛粪 60 m^3·hm^{-2}(有机质含量 14.8%); 增施磷肥和有机肥处理, 在增施牛粪 60 m^3·hm^{-2}的同时增施磷肥 207 kg(P_2O_5)·hm^{-2}, 每个试验处理种植 0.3 hm^2, 试验在白坊子示范区进行。

1.3　田间管理与指标测定

除了试验处理外, 其他田间管理一致, 整个生育期实施充分灌溉。各个生育期进行常规田间调查, 冬小麦在出苗期、冬前、返青、拔节、孕穗、扬花和灌浆期, 夏玉米在出苗、大喇叭口、抽雄吐丝和灌浆期, 进行密度、生物量等调查。冬小麦扬花和夏玉米抽雄吐丝的关键生育期, 进行主要生理指标田间观测, 主要测定内容有: 叶片光合速率、冠层截光率、冠层温度、株型特征等。试验与示范小区收获测产, 收获后脱粒机脱粒测定籽粒产量, 收获时各处理取样, 冬小麦取 60 茎, 夏玉米区 3 株, 进行考种。

1.4　数据分析

采用 SPSS 13.0 对数据进行统计分析, 基于 Microsoft office 2007 进行作图。

2　结果与讨论

2.1　品种产量潜力与生育期合理搭配

作物籽粒产量的形成主要由个体与群体长势强弱和灌浆时间长短决定的, 长势强则对光热、养分、水分等资源的利用能力强、光合速率高、抵御逆境的抗性也强, 在充分的灌浆时间里产量实现更接近潜力值[8]。小麦生育后期日最高气温超过 30 ℃会导致叶片早衰, 产量降低, 严重地区或年份减产可达 10%~20%[9]。在其他生育进程不变的情况下, 花后增温将会导致小麦减产, 同时小麦籽粒物质组成也将发生复杂的变化, 从而影响到小麦的品质[10]。灌浆后期的干热风, 是造成该地区冬小麦产量潜力发挥和品质提高的最大障碍之一, 影响了正常的生理成熟进程, 造成籽粒重降低、品质变差。选择扬花授粉期提早, 后期灌浆速率快, 偏早熟且熟性好的冬小麦品种, 尽量避开干热风的不利影响, 更利于冬小麦产量与品质的提高与改善。

小麦处于最佳品种、播期、密度组合时, 冬前、春季群体总茎数最多, 小麦获得最高产[11]。适宜播期可充分利用光、热、水资源, 有利于培育壮苗, 构建合理的群体结构, 穗数、穗粒数和千粒重协调发展[12]。冬小麦适期晚播, 对生育进程及产量不会造成显著影响。不同播期与播量的田间试验结果表明, 随着播期的推迟, 适当增加播量, 对最终产量并不产生显著影响(表 1)。多年气候变化趋势表明, 该地区冬小麦收获前大于 30 ℃高温天气出现的几率增加明显, 不利于后期的灌浆(图 1b)。早熟品种提早进入灌浆期, 受后期干热风的危害小, 灌浆更充分。如图 2 不同品种田间试验结果所示, 早熟冬小麦品种‘小偃 81’与其他品种相比, 在该地区产量无显著差异, 且粒重稳定。2013 年与 2012 年相比, 其他两个品种之间籽粒重相差 10%~22%。

表 1　不同播种期与播种量(基本苗)对冬小麦产量的影响
Table 1　Effects of different sowing dates and sowing rates (based on seedling number) on grain yield of winter wheat

播量 Sowing rate (10^4plant·hm^{-2})	播期(月–日) Sowing date (month-day)		
	10–07	10–14	10–21
375	5 712.1a	5 116.2b	3 913.6c
450	5 745.9a	6 281.8a	4 341.8b
525	5 087.4b	5 297.0b	4 913.8a

不同小写字母表示 P<0.05 水平差异显著。Different lowercase letters show significant difference at P< 0.05 level.

黄淮海一年两熟作物区域, 可通过夏玉米适期早播、选用中熟品种, 增加吐丝后期的有效积温, 以保证玉米生育后期充足的有效积温和籽粒充足的灌浆时间, 达到增产的目的[13]。在冬小麦–夏玉米一年两作周年生产周期里, 生育期约束了两种作物对气候资源有效和充分利用。玉米生育期相对较短, 但生育期内温度高、降水多, 气候资源集中且丰富, 有着更大的产量提升空间。早播玉米苗全、苗旺, 个体强, 群体旺, 抽雄吐丝提早。夏玉米不同播期试验表明(图 3a), 早播玉米比晚播玉米增产幅度在 3.4%~21.6%, 平均增产 17.2%。夏玉米提早播种, 生育进程提前, 利于避开 7 月下旬到 8 月上旬多阴雨

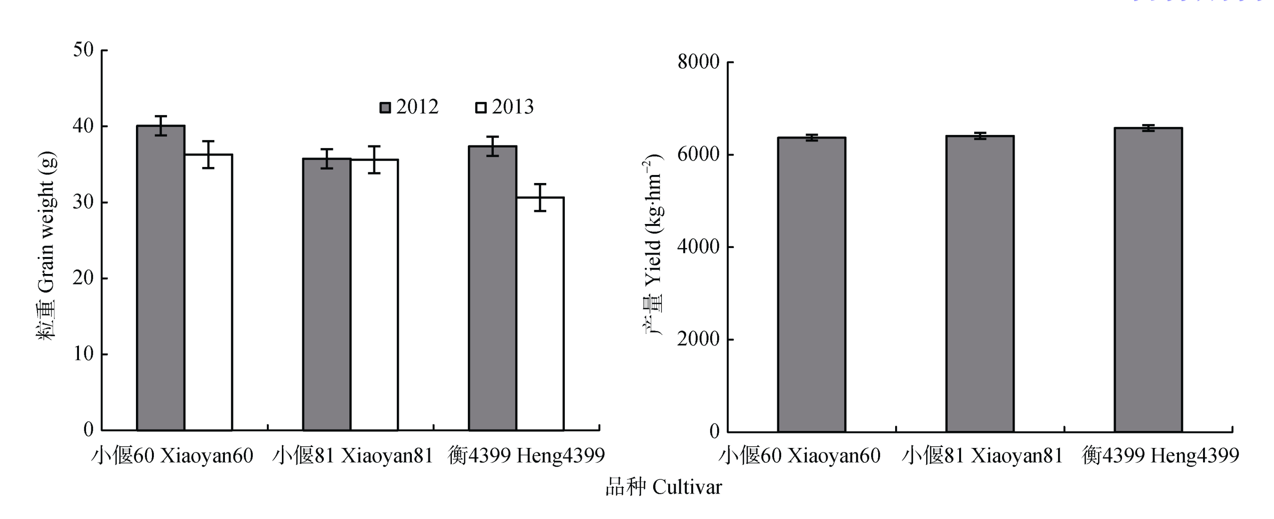


图 2 研究区不同冬小麦品种的产量和粒重

Fig. 2 Grain weight and grain yield of different winter wheat cultivars at the study area

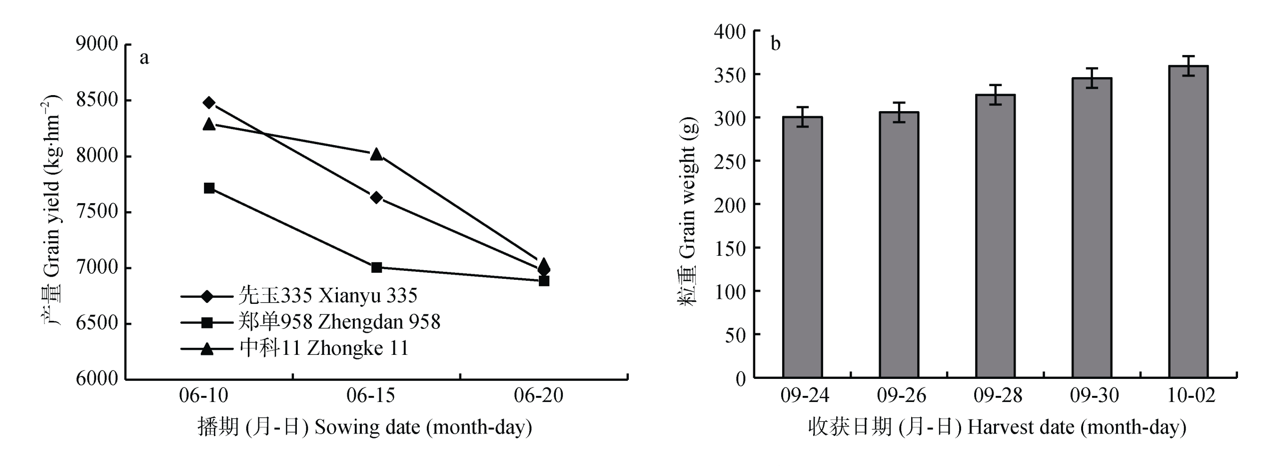


图 3 播期对不同品种玉米产量(a)和收获日期对'郑单 958'玉米粒重(b)的影响

Fig. 3 Effects of sowing date on grain yield of different maize cultivars (a) and harvest date on grain weight of maize 'Zhengdan 958' (b)

天气对授粉的影响，更为重要的是提早了灌浆时间，且早期高温环境下的灌浆速率更高，明显地提高了产量。

玉米生长后期的 9 月下旬，天气晴朗多照，为灌浆提供了适宜的环境。该地区玉米进入 9 月下旬开始收获，由于收获偏早，影响了后期的充分灌浆和熟性。花粒后灌浆期增光，增加了夏玉米的干物质积累量、籽粒灌浆速率，显著提高夏玉米产量[14]。粒重直接关系到夏玉米的产量和品质，除了后期低温天气影响灌浆外，延迟收获更利于籽粒重增加和品质的提高。增强吐丝期至成熟期光合有效辐射的生产效率，强源促库，可以提高逆境下夏玉米生产的能力和适应性[15]。不同时期收获粒重试验表明(图 3b)，10 月 2 日收获比 9 月 24 日收获，粒重增加 19.5%。只要后期不提早出现持续低温天气，玉米灌浆一直保持到乳熟黑线的出现，籽粒饱满，产量和品质也较高。

2.2 玉米冠层结构优化与适宜的种植方式

夏玉米高产以"群体结构性获得"为主要突破途径，在高密度群体中进一步挖掘"个体功能性获得"，产量性能参数差异补偿是高产玉米品种实现高产的主要机制[16]。玉米的收获指数可达 0.5 以上，80%以上籽粒产量直接来自于开花后的光合产物，即产量主要由吐丝期—乳熟期群体结构决定[6]。在保持较高收获指数的同时，提高与稳定田间群体的整体生物量，是实现玉米高产与稳产的基本前提[17]。多年试验与示范结果表明，该地区要想进一步增加群体密度、提高群体的生物量水平，需要更加合理的种植方式。不同种植方式试验结果表明(图 4)，将种植密度提高到 6.75×10^4 株·hm^{-2}，通过改变传统的 60 cm 等行距种植为 40 cm 与 80 cm 大小行种植和 38 cm×38 cm 的等行距种植更利于产量的提高和稳定。适宜的种植方式产量可提高 15%以上。不同的种植方式影响了不同叶位的叶面积大小，进而影响田间群体

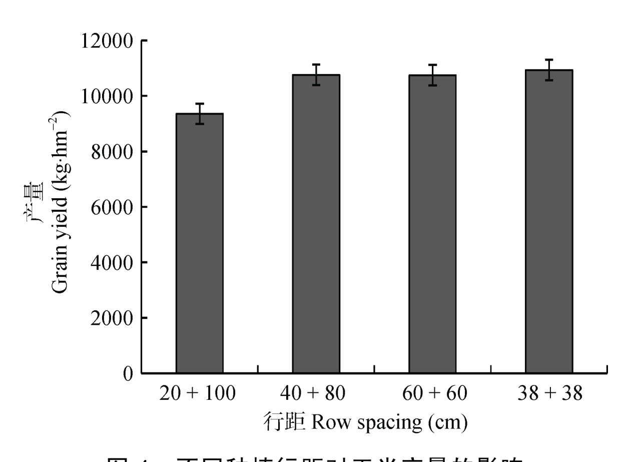


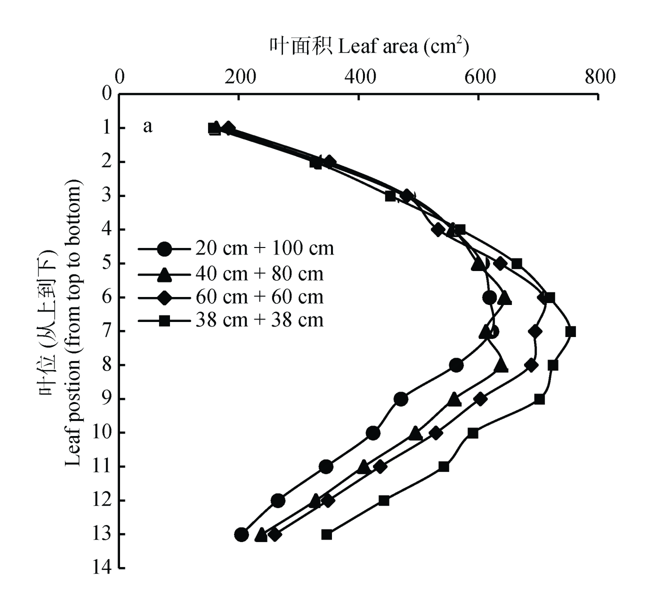
图 4　不同种植行距对玉米产量的影响

Fig. 4　Effect of plant spacing on grain yield of maize

的冠层结构。适宜的等行距种植和大小行种植，利于提高中部穗位附近叶片的面积(图 5a)。穗位附近叶片的光合能力和水平提高，更利于玉米籽粒的灌浆和产量的形成[14,16]。不同种植方式之间，冠层底部对光合有效辐射的截光率，没有太大的影响，主要是影响了穗位部叶片对光合有效辐射的截获(图 5b)。因此，根据品种株型特性，通过适宜的行距与株距调整与优化，可以进一步发挥夏玉米的产量潜力。

2.3　根层土壤耕作与施肥管理

根据不同区域土壤特点和环境条件，采用不同的耕作方式，更利于作物产量潜力的发挥。该地区冬小麦夏玉米一年两作的种植体系中，冬小麦播种



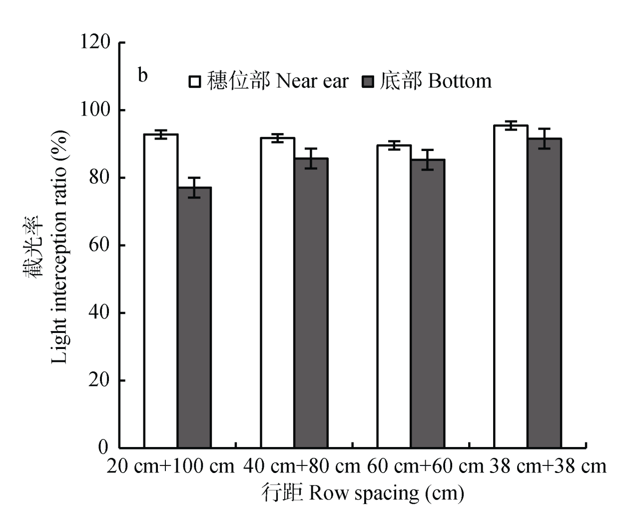


图 5　不同行距对玉米不同部位叶片面积**(a)**和冠层截光率**(b)**的影响

Fig. 5　Effect of row spacing on leaf area of different position leaves (a) and light interception ratio (b) of maize

前机械旋耕一次，深度一般不超过 15 cm。由于机耕的压迫和机耕较浅，下层土壤过紧，多年来已形成影响作物扎根的犁底层，不利于作物的生长发育。尤其根系较发达、对土壤空气要求较多的作物受到的影响更大，影响了作物生长潜力的发挥。高产玉米品种在土壤深松条件下获得较高的产量，主要是由于产量性能参数间正向超补偿作用的结果[16]。夏玉米深松播种种植试验结果表明(图 6)，玉米深松播种当年产量明显提高 31.3%，随后小麦季明显增产 5.6%。小麦收获后秸秆还田，玉米通过深松与播种同步作业，明显地提高了玉米的产量，同时也改善了后茬冬小麦的产量。土壤耕层 0~35 cm 田间持水量，深松比常规旋耕分别提高 7.4%，生物产量和经济产量均以深松最高[18]。玉米深松深度超过了 30 cm，打破了犁底层土体，提高了深层土壤的储水保墒能力，有利于根系在大范围吸收水分和养分。深松玉

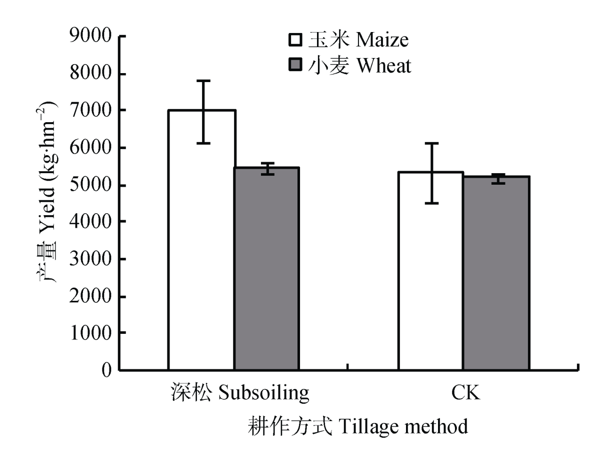


图 6　不同耕作方式对夏玉米及其后茬冬小麦产量的影响

Fig. 6　Effects of different tillage methods on grain yields of summer maize and the later crop of winter wheat

米长势明显好于非深松种植玉米，最终转化为产量优势。然而，深松不宜频繁，这种产量优势，连续两年深松，并没有表现出明显的优势。每隔 3 年以上，

进行一次深松，可能效果更好，经济效益也好。

肥力水平较低的脱盐潮土，在冬小麦夏玉米一年两作的高复种指数种植模式下，作物每年从土壤中带走的钾素较多。即使将还田的秸秆钾换算成等量的肥料钾，对土壤速效钾的增加效果也远没有提高钾水平[19]。施钾和秸秆还田，可使各种速效钾含量明显升高，反映了潮土固钾能力不强，从而使投入土壤中的钾仍以速效钾的形态存在。整个生育期，高产夏玉米能持续吸收氮、磷、钾养分，施用氮肥、钾肥能显著提高夏玉米的产量，氮和钾是高产夏玉米主要养分限制因素，其中，N 当季回收率为 18.05%，P_2O_5 为 14.55%，K_2O 为 18.34%，每生产 100 kg 经济产量需吸收的 N、P_2O_5 和 K_2O 的量分别为 1.62 kg、0.69 kg 和 1.83 kg[20]。夏玉米播种时增施钾肥试验结果显示，增施钾肥一定程度提高了夏玉米的产量，增产 2.6%(图 7)。秸秆还田结合施用钾肥不仅可以提高玉米产量、增加养分吸收总量，还有利于土壤钾素的收支平衡，提高土壤速效钾含量，对维持土壤钾素肥力的稳定具有重要的作用[21]。

磷肥的当季利用率一般只有 10%~25%，75%~90%的磷肥以不同形态的磷酸盐积累在土壤中[22]。遇到多雨年份，该地区地下水位经常抬升到地表，甚至出现短期地表滞水，容易造成土壤中累计磷酸盐的损失。冬小麦播种前底肥增施磷肥试验结果表明，增施磷肥明显地提高了冬小麦的产量(图 7)，增产达 7.4%，同时也利于补充夏玉米生长季对磷的需求。增施有机肥结果显示，冬小麦播种前增施有机底肥同样明显地提高了冬小麦的产量，增产 6.8%。然而，增施有机底肥的同时，增施磷肥，产量也明显提高 8.8%，但并没有出现二者累加的效果。土壤有机质增加是一个长期的地力提升过程，短期内速效养分对当季作物增产效果更明显。

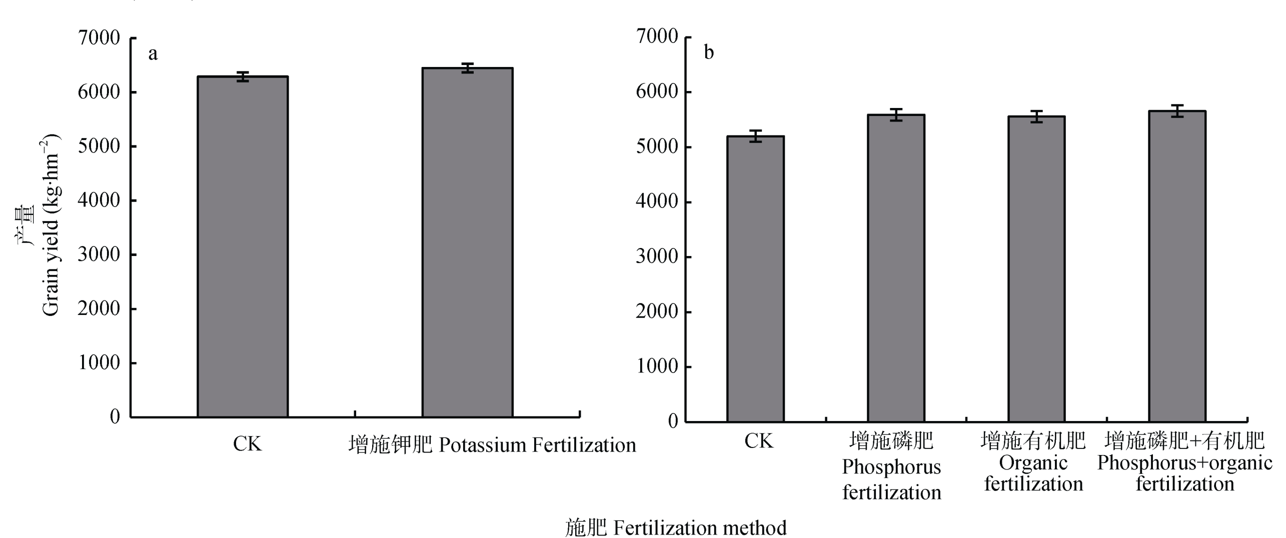


图 7 增施磷肥和钾肥对夏玉米(a)和冬小麦(b)产量的影响

Fig. 7 Effect of K and P fertilizers application on the grain yields of summer maize (a) and winter wheat (b)

3 结论

渤海粮仓主要增粮区域的河北低平原地区，分布有大面积的中低产农田，增产潜力巨大。考虑该地区气候与环境资源特点和冬小麦夏玉米种植生产中存在的限制因素，该研究从 3 个方面对该地区的粮食增产理论与技术进行了研究总结，提出了适宜该地区粮食增产的方式和途径。

第一，冬小麦夏玉米“双早双晚”周年种植。根据冬小麦和夏玉米不同品种的生育期特性，选择抗盐、耐旱、早熟的冬小麦品种，冬小麦提早收获、夏玉米提早播种(双早)，夏玉米适当延晚收获、冬小麦适期晚播(双晚)。在冬小麦产量稳定的同时，注重提高籽粒的品质，同时发挥夏玉米的增产空间。形成一个与当地环境更为适宜的冬小麦夏玉米种植体系，提高作物生育进程中对水、肥、光、热等资源的利用能力和效率，减少粮食生产过程中对环境形成的压力。

第二，“稳夏增秋”与夏玉米种植方式调整。冬小麦生长季干旱少雨及对灌溉水的依赖，在制约了产量进一步提升的同时，也与该地区水资源短缺和水生态恶化问题的冲突加剧。进一步提高冬小麦对土壤水的利用效率，减少对灌溉用水的依赖，实现稳产和提质更符合该地区粮食增产的要求。夏玉米生长季丰富的气候资源有着巨大的增产空间，夏玉米产量潜力的进一步提升重要限制因素是适宜的冠层，

形成一个更大的生物量群体。通过改变行距和株距，适当增加密度，可明显地提高和稳定产量。密度提高到 $6.75\times10^4\cdot hm^{-2}$, 40 cm+80 cm 的大小行种植和 38 cm 的等行距种植，是该地区更为适宜的种植方式。

第三，深松打破犁底层和增施磷、钾肥种植。该地区大部分属于脱盐潮土，同时在多雨年份地下水位上升、存在短期滞水，土壤的肥力水平偏低。在秸秆还田的同时，通过深松技术，打破犁底层，改善土壤结构，释放根系对土壤养分和水分的吸收利用空间。同时在冬小麦播种时底肥增施磷肥，玉米播种时增施钾肥，改善土壤的速效养分状况，一定程度提高了冬小麦夏玉米的周年产量。冬小麦夏玉米全程秸秆还田、夏玉米深松播种，结合增施磷、钾肥，在保证地力逐步提升的同时，短期内改善土壤缺磷少钾的状况，利于冬小麦夏玉米周年产量的稳定。

粮食增产是品种更新与土壤地力提升协调演进的过程，品种的生育期进程与当地环境耦合与适应，个体株型特征和群体结构更能高效地对地上光热资源和地下水肥资源充分利用，是品种实现产量潜力的根本所在。植株个体及其所构成的群体在空间的配置态势，包括地上进行光合作用的冠层结构和地下进行吸收作用的根系结构的优化，是影响群体光分布与光合特性的重要因素，同时也通过影响群体内部水、热、气等微环境而影响群体的光合效率和产量。通过适宜的品种选择和相应的耕作、栽培和管理措施，塑造合理群体结构，改善冠层通风透光条件，有利于提高群体产量潜力，可实现作物产量的逐步提高和稳定。

参考文献 References

[1] 李振声, 欧阳竹, 刘小京, 等. 建设“渤海粮仓”的科学依据——需求、潜力和途径[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(4): 371–374
Li Z S, Ouyang Z, Liu X J, et al. Scientific basis for constructing the “Bohai sea granary”: Demands, potential and approches[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 26(4): 371–374

[2] 康绍忠, 杜太生, 孙景生, 等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 661–667
Kang S Z, Du T S, Sun J S, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency based on crop growing water demand information[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 661–667

[3] Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul H P. Management of crop water under drought: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 401–442

[4] 屈宝香, 李文娟, 钱静斐. 中国粮食增产潜力主要影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2009, 30(4): 34–39
Qu B X, Li W J, Qian J B. Analysis of major factors influencing grain yield increasing potential of China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2009, 30(4): 34–39

[5] 田中伟, 王方瑞, 戴廷波, 等. 小麦品种改良过程中物质积累转运特性与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(4): 801–808
Tian Z W, Wang F R, Dai T B, et al. Characteristics of dry matter accumulation and translocation during the wheat genetic improvement and their relationship to grain yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(4): 801–808

[6] Zhang X Y, Wang S F, Sun H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 50: 52–59

[7] 吕硕, 杨晓光, 赵锦, 等. 气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 179–190
Lü S, Yang X G, Zhao J, et al. Effects of climate change and variety alternative on potential yield of spring maize in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 179–190

[8] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 535–543
Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. A comparative study of yield, cost-benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat-maize under rain-fed in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 535–543

[9] 李永庚, 于振文, 张秀杰, 等. 小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 461–466
Li Y G, Yu Z W, Zhang X J, et al. Response of yield and quality of wheat to heat stress at different grain filling stages[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(3): 461–466

[10] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 等. 花后开放式增温对小麦产量及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1489–1498
Bian X B, Chen D D, Wang Q S, et al. Effects of different day and night temperature enhancements on wheat grain yield and quality after anthesis under free air controlled condition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1489–1498

[11] 蒋会利. 播期密度对不同小麦品种群体茎数及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(6): 67–73
Jiang H L. Effect of sowing date and density on stem number and yield of different wheat variety[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(6): 67–73

[12] 董剑, 赵万春, 陈其皎, 等. 陕西关中地区不同冬小麦品种晚播高产的适宜播期和密度[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 66–69
Dong J, Zhao W C, Chen Q J, et al. Researches on suitable planting date and sowing rate for the late-sown high yield of different winter wheat cultivars in Guanzhong area of Shaanxi[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,

2010, 19(3): 66–69
[13] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1074–1083
Li X L, Li C F, Hou Y H, et al. Dynamic characteristics of summer maize yield performance in different planting dates and its effect of ecological factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(6): 1074–1083
[14] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427–4434
Shi J G, Cui H Y, Zhao B, et al. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(21): 4427–4434
[15] 薛吉全, 张仁和, 马国胜, 等. 种植密度、氮肥和水分胁迫对玉米产量形成的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(6): 1022–1029
Xue J Q, Zhang R H, Ma G S, et al. Effects of plant density, nitrogen application, and water stress on yield formation of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(6): 1022−1029
[16] 侯海鹏, 丁在松, 马玮, 等. 高产夏玉米产量性能特征及密度深松调控效应[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 1069–1077
Hou H P, Ding Z S, Ma W, et al. Yield performance characteristics and regulation effects of plant density and sub-soiling tillage system for high yield population of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(6): 1069–1077
[17] 边大红, 张瑞栋, 段留生, 等. 局部化控夏玉米冠层结构、荧光特性及产量研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 139–145
Bian D H, Zhang R D, Duan L S, et al. Effects of partial spraying of plant growth regulator on canopy structure, chlorophyll fluorescence characteristic and yield of summermaize (*Zea mays* L.)[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(3): 139–145
[18] 孔晓民, 韩成卫, 曾苏明, 等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 108–113
Kong X M, Han C W, Zeng S M, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties and maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(1): 108–113
[19] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 133–139
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(1): 133–139
[20] 王宜伦, 韩燕来, 张许, 等. 氮磷钾配比对高产夏玉米产量、养分吸收积累的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 88–92
Wang Y L, Han Y L, Zhang X, et al. Effects of different fertilizers on yield and plant nutrient accumulation of high-yield summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(6): 88–92
[21] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1110–1118
Xie J G, Hou Y P, Yin C X, et al. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1110–1118
[22] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 959–965
Liu J L, Liao W H, Zhang Z X, et al. The response of vegetable yield to phosphate fertilizer and organic manure and environmental risk assessment of phosphorus accumulated in soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 959–965